

現在及び近未来の気候変化への温暖化の寄与の評価に資する高解像度大アンサンブル気候データセットの作成

課題責任者

辻野 博之 一般財団法人気象業務支援センター・研究推進部

著者

辻野 博之^{*1,2}, 水田 亮^{*2,1}, 野坂 真也^{*2,1}, 川瀬 宏明^{*2,1}, 吉田 康平^{*2,1}, 関澤 偲温^{*2,1}, 山田 洋平^{*1}, 初塚 大輔^{*1}, 伊藤 瑠衣^{*3}, 鈴木 智恵子^{*3}, 岡地 寛季^{*4}, 宮本 真希^{*4}, 鈴木 真一^{*5}, 高橋 千陽^{*6}, 林 未知也^{*7}, 今田 由紀子^{*6}, 山本 浩大^{*8}, 萬 和明^{*8}, 石川 洋一^{*3}

^{*1} 気象業務支援センター 研究推進部 第一研究推進室, ^{*2} 気象庁 気象研究所, ^{*3} 海洋研究開発機構 付加価値情報創成部門 地球情報科学技術センター, ^{*4} 北海道大学大学院 工学研究院, ^{*5} 東北大学大学院 理学研究科, ^{*6} 東京大学大気海洋研究所, ^{*7} 国立環境研究所, ^{*8} 京都大学 防災研究所

キーワード: 気候変化, 近未来, アンサンブル実験, 全球気候モデル, 力学的ダウンスケーリング

1. はじめに

近年、日本においても猛暑の恒常化や豪雨、豪雪の高頻度化等、気候変化や自然災害が顕著となり、将来の気候変化を踏まえた対策の必要性がますます高まっている。亜熱帯から亜寒帯域に属する日本には、多様な気候と極端現象がみられ、これらは地形の影響を大きく受けるため、正確なシミュレーションには高分解能が求められる。また、極端現象は発生頻度が低いため、シミュレーションの多アンサンブル化も必須である。従って、日本の気候や極端現象の変化の分析には、日本を網羅する高分解能地域モデルによる多アンサンブルシミュレーションデータが最適となる。また、南北の気温差が大きい日本を対象とするには、地域モデルに境界値を与える全球モデルの精度も重要となる。

文部科学省気候変動予測先端研究プログラムでは、今まで十分に提供されていなかった、過去・現在・将来が時間的に連続した気候変動データセット作成を目的に、全球 60km モデルによる予測実験と、それを境界として全国を対象とした日本域 5km モデルによる力学的ダウンスケーリングを実施している。今回の計算では、全球モデルに大気-海洋相互作用を導入することにより、d4PDF⁽¹⁾やそれに基づく全国 5km メッシュアンサンブル気候予測データ (d4PDF5kmDDS)⁽²⁾を高精度化している。ただし、この実験はメンバー数を必要最低限に抑えた基盤データ作成実験であるため、低頻度の極端現象を網羅し、近未来を含む将来の各年代の気候状態の変化を正確に評価するには、メンバー数を増強するとともに、非温暖化実験等の対照実験も実施する必要がある。これらにより d4PDF では評価できなかった、将来の各年代における、気候状態や極端現象の頻度や強度の変化の評価等も可能となる。

本課題では、1990 年代から 2010 年代の 30 年間を対象とした過去再現実験、及び 2030 年代から 2050 年代に相当する 30 年間を対象とした CO₂ 濃度上昇が中程度の将来予測実験を中心として、アンサンブルメンバー増強を行い、気候状態や極端気象に対する確率的評価を行って相互比較し、適応計画の立案等、社会貢献につながるような

分析をする。さらに、対照実験となる非温暖化実験や CO₂ 濃度上昇が抑制される将来シナリオのもとでの予測実験を実施して、日本域への温暖化の影響を、工業化前からの変化として評価したり、気候緩和策の社会実装が実際に効果を現す時期を特定したりする等の分析を行い、さらなる社会貢献を目指す。

2. 実験設定

2.1. 全球モデル

全球モデルは、気象研究所の気候モデル MRI-ESM2⁽³⁾の大気解像度を 120km から 60km に高解像度化したものを使用し、海水温・塩分濃度・海水密度を Incremental Analysis Update⁽⁴⁾の手法で 10 日 (海水のみ 5 日) の緩和時間スケールで同化する。このモデルを Time Sequential Experiments with Coupled model (TSE-C) と呼んでいる⁽⁵⁾。過去実験の期間 (1961-2020) は客観解析データ⁽⁶⁾に同化した。将来実験期間 (2021-2100) においては、CMIP6 の代表的な 6 モデルにおける海洋の人為的将来変化 (EOF 第 1 及び第 2 モードとして抽出することで年々変動を除去したもの) に客観解析の年々の内部変動 (EOF 第 1 及び第 2 モードを除去したもの) を加えたものを海洋の予測値とし、それに同化した。非温暖化実験では、同様の手法で現在までの海洋の人為的变化を除去したものに同化した。

2.2. 日本域モデル

非静力学地域気候モデル (NHRCM5)⁽⁷⁾を用いて、全球モデルの計算結果を境界条件として 20km 解像度にダウンスケーリングした計算を実施した (NHRCM20)。さらに NHRCM20 の結果を境界条件として 5km 解像度へとダウンスケーリングした (NHRCM05) 計算期間は、1990 年から 2019 年までの現在気候と、2030 年から 2059 年までの将来気候それぞれ 30 年である。積分は NHRCM20 では各年 7 月 20 日から翌年 8 月末まで、NHRCM05 では、各年 7 月 24 日から翌年 8 月末までを実施している。d4PDF5kmDDS と比較して、本実験では、NHRCM20 の計算領域を拡大したほか、スペクトルナッジングが動作する最低高度を低くし、ナッジング

する波長を長くしたことで境界データとして用いる全球モデルの気圧の再現性を向上させている。NHRCM05 では、積雲対流パラメタリゼーションを調整し、海岸や島での降水の再現性を向上させている。

3. 全球モデルによる実験結果

全球 60km モデルによる過去再現実験・将来実験・非温暖化実験における日本付近の年平均気温の変化を図 1 に示す。過去再現実験については 36 メンバー実施し、メンバー間の標準偏差を陰影で表している。非温暖化実験と比較すると、1990 年代後半以降に有意な差が生じており、人為起源による気温の上昇が見られることがわかる。将来実験については中 CO₂ 濃度シナリオ (SSP2-4.5) と低 CO₂ 濃度シナリオ (SSP1-2.6) についてそれぞれ 36 メンバー、高 CO₂ 濃度シナリオ (SSP5-8.5) については 10 メンバー実施した。2040 年代中頃まではシナリオ間の差は小さいが、SSP1-2.6 ではそれ以降気温上昇が止まるのに対して、SSP2-4.5 や SSP5-8.5 では気温上昇が継続し、21 世紀末にはそれぞれ約 3℃、5℃に達する。これらの過去再現実験・将来実験における経年変化は、観測された変化・CMIP6 モデルにおける変化とそれぞれ整合的になっていることを確認している。

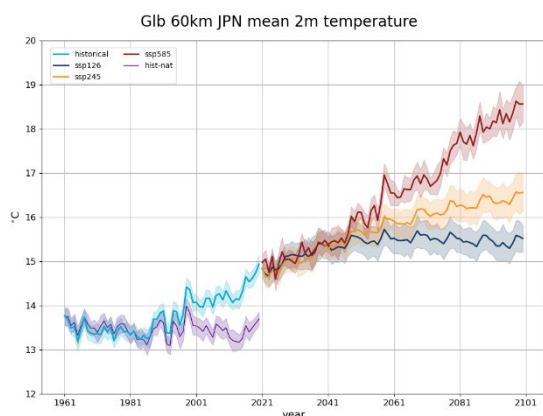


図 1 全球 60km モデルにおける日本域平均の年平均気温(青:過去再現実験、紺:SSP1-2.6 実験、黄:SSP2-4.5 実験、赤:SSP5-8.5 実験、紫:非温暖化実験)。陰影はメンバー間の標準偏差を表す。

4. 日本域モデルによる実験結果

NHRCM20 による SSP2-4.5 実験 36 メンバーをモデル海洋に強制した 6 モデルの温暖化パターン及び 6 種類の内部変動パターンでグループ分けし、それぞれの平均及びそのばらつきを調べた。日本陸上の気温、積算降水量を冬季、夏季に分けて 10 年移動平均したものを図 2, 3 に示している。内部変動のパターンが与えるばらつきは将来気候下で拡大していかないが、温暖化パターンが与えるばらつきは年代が進むにつれて拡大する傾向にある。平均気温は夏季冬季いずれも 2040 年頃に温暖化パターンによるばらつきが内部変動パターンによるばらつきより大きくなる。積算降水量は冬季において、2050 年頃から温暖化パターンによるばらつきが内部変動によるばらつきより大

きくなっているが、夏季にはそういった傾向は 2090 年頃まで見られない。降水の予測には気温の予測以上に内部変動パターンが大きく影響し、特に夏季の降水に影響を与えていると考えられる。

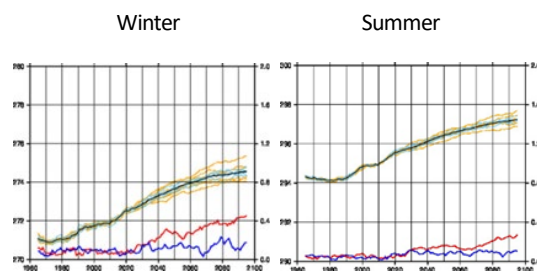


図 2 日本陸上格子の冬季(左)、夏季(右)の 10 年移動平均気温(黒:36 メンバー平均、水色:各自然変動年代平均、橙:各パターン平均、目盛りは左側で単位 K)、及び標準偏差(青:自然変動平均 6 本の標準偏差、赤:各モデル平均 6 本の標準偏差、目盛りは右側で単位 K)。

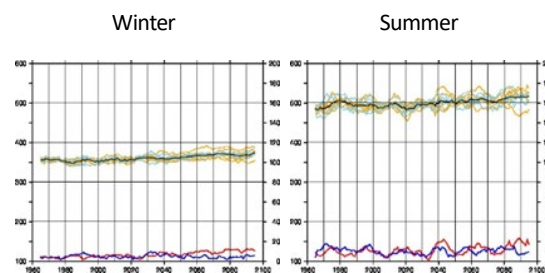


図 3 日本陸上格子 10 年移動平均季節積算降水量(図 2 と同様、単位 mm)。

謝辞

本課題に使用した予測システムの開発及び基盤実験は、文部科学省気候変動予測先端研究プログラム領域課題 3 「日本域における気候変動予測の高度化」(JPMXD0722680734) において実施されたものである。実験の仕様決定や実験の実施にあたっては、同プログラムの領域課題 1 (JPMXD0722680395)、領域課題 4 (JPMXD0722678534) の支援を受けた。

文献

- [1] Mizuta, R., et al., “Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models.” Bull. Amer. Meteor. Soc. July 2017, 1383-1398, (2017)
- [2] Kawase, H., Nosaka, S., Watanabe, S. I., et al., “Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario.” Journal of Geophysical Research Atmosphere, <https://doi.org/10.1029/2023JD038513>, (2023).
- [3] Yukimoto, S., et al., “The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the

- physical component.” J. Meteorol. Soc. Jpn., 97, 931-965, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>, (2019).
- [4] Bloom, S. C., Takacs, L. L., Da Silva, A. M., & Ledvina, D., “Data assimilation using incremental analysis updates.” Monthly Weather Review, 124, 1256-1271, (1996).
- [5] Mizuta, R., Endo, H., Kawai, H. et al., “Climate simulations using MRI-ESM2 with 60 km resolution atmosphere and data assimilated ocean” J. Meteorol. Soc. Jpn., 104, 10, <https://doi.org/10.1007/s44394-025-00011-2>, (2026).
- [6] Ishii, M., Fukuda, Y., Hirahara, S., Yasui, S., Suzuki, T., & Sato, K., “Accuracy of global upper ocean heat content estimation expected from present observational data sets.” SOLA, 13, 163-167. <https://doi.org/10.2151/sola.2017-030>, (2017).
- [7] Sasaki, H., Kurihara, K., Takayabu, I., & Uchiyama, T., “Preliminary experiments of reproducing the present climate using the non-hydrostatic regional climate model.” SOLA, 4, 25-28. <https://doi.org/10.2151/sola.2008-007>, (2008).